



Doctoral Thesis

InP HEMT technology for applications at cryogenic temperatures

Author(s):

Limacher, Roger André

Publication Date:

2006

Permanent Link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-005194625> →

Rights / License:

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#) →

This page was generated automatically upon download from the [ETH Zurich Research Collection](#). For more information please consult the [Terms of use](#).

Diss. ETH No. 16442

InP HEMT Technology for Applications at Cryogenic Temperatures

A dissertation submitted to the
SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY
ZURICH

for the degree of
Doctor of Sciences

presented by
ROGER ANDRÉ LIMACHER
Dipl. El.-Ing. ETH
born March 27, 1973
citizen of Schüpfheim (LU), Switzerland

accepted on the recommendation of
Prof. Dr. W. Bächtold, examiner
Prof. Dr. H. Jäckel, co-examiner

2006

Diss. ETH No. 16442

InP HEMT Technology for Applications at Cryogenic Temperatures

A dissertation submitted to the
SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY
ZURICH

for the degree of
Doctor of Sciences

presented by
ROGER ANDRÉ LIMACHER
Dipl. El.-Ing. ETH
born March 27, 1973
citizen of Schüpfheim (LU), Switzerland

accepted on the recommendation of
Prof. Dr. W. Bächtold, examiner
Prof. Dr. H. Jäckel, co-examiner

2006

Abstract

In this dissertation, investigations and developments on our in-house 0.2 μm indium-phosphide high electron mobility transistor (InP HEMT) technology with regard to its use in cryogenic applications are presented. InP HEMTs show excellent noise and gain performance at microwave frequencies, and at cryogenic temperatures the device properties can even further be improved. This makes the InP HEMT the favored device in receiver systems for radio astronomy and deep-space communication, which have the most stringent requirements for low noise and high sensitivity. In addition to the technology developments, device characterization, device modeling, and circuit designs were performed within the scope of this work.

For the fabrication of metal-insulator-metal capacitors and for device passivation, a SiN_x deposition process was introduced in the HEMT process. The passivation layer improves the long-term stability of the device and stabilizes the T-gate mechanically. The SiN_x layer above the active area of the device, however, influences the device performance. A small reduction of the cut-off frequency was the trade-off against improved reliability. On the other hand, the developed passivation layer only showed a marginal influence on the DC and noise performance of the device.

Minimum contact resistances are important for high transconductance and low noise. Therefore, the ohmic contacts at the drain and the source side of the device were optimized and analyzed. To achieve good contacts at room and cryogenic temperatures, a deep doping profile of the ohmic contacts had to be ensured since the channel is located around 40 nm below the surface.

To find the most suitable vertical structure for cryogenically cooled

low-noise amplifiers, devices with various epitaxial layer stacks were investigated. We focused on layer structures with an increased indium content in the channel, which can provide higher electron mobility and velocity. The transport properties are further significantly improved at cryogenic temperatures due to the vanishing influence of the phonon scattering. The DC, RF, and noise analyses of the various devices were performed at room and cryogenic temperatures. Thanks to the superior material properties of the pseudomorphic HEMT structures, the performance of these devices could be improved in terms of gain, noise, and power consumption compared to the lattice-matched HEMTs.

With regard to the design of low-noise amplifiers, a bias dependent small-signal model was developed. An excellent agreement of simulated and measured S-parameters at room and cryogenic temperatures showed that the extrinsic and intrinsic elements of the small-signal equivalent circuit were accurately determined. Next to the possibility of setting the bias points, the developed model also allows to change the number of gate fingers and the gate width. The scalability of the model was validated for various device geometries and in a wide bias range.

Based on the investigated HEMT layer structures, low-noise amplifiers were developed covering various frequency bands from 4 to 49 GHz. The very good performance of the developed C/X-, K-, and Q-band amplifiers under cryogenic conditions showed the suitability of our 0.2 μm InP HEMT technology for cryogenic applications. In order to demonstrate the superior performance of the strained-channel over the lattice-matched HEMT layer structure, a K-band low-noise amplifier was designed and fabricated for both material systems. Higher gain and lower noise could be achieved for the amplifier with the strained-channel layer stack.

Zusammenfassung

In dieser Dissertation werden Weiterentwicklungen unserer $0.2\ \mu\text{m}$ Indium-Phosphid "high electron mobility transistor" (InP HEMT) Technologie im Hinblick auf deren Verwendung bei kryogenen Temperaturen vorgestellt. InP HEMTs zeichnen sich durch ein hervorragendes Rausch- und Verstärkungsverhalten im Mikrowellenfrequenzbereich aus. Deren Rausch- und Verstärkungseigenschaften können durch Abkühlen weiter verbessert werden. Deshalb eignen sich die InP HEMTs sehr gut für Empfängersysteme, welche den höchsten Anforderungen bezüglich Rauschen und Empfindlichkeit genügen müssen, wie zum Beispiel jenen der Radioastronomie oder Weltraumkommunikation. Neben der Weiterentwicklung der InP HEMT Technologie werden im Rahmen dieser Arbeit auch die Charakterisierung und Modellierung der Transistoren und der Entwurf von Schaltungen ausführlich diskutiert.

Ein SiN_x Abscheidungsprozess wurde entwickelt und in den InP HEMT Prozess integriert. Die SiN_x Schicht wird zur Herstellung von Metall-Isolator-Metall Kapazitäten verwendet; sie dient aber auch als Passivierungsschicht der HEMTs. Die Passivierungsschicht verbessert das Langzeitverhalten der HEMTs und die mechanische Stabilität des T-Gates. Jedoch beeinflusst die SiN_x Schicht oberhalb des aktiven Gebiets des HEMTs auch dessen elektrisches Verhalten. Es musste deshalb eine leicht niedrigere Transitfrequenz in Kauf genommen werden. Die Rausch- und DC-Eigenschaften haben sich andererseits nur unwesentlich verändert.

Des Weiteren wurden die ohmschen Kontakte am Drain und Source optimiert und analysiert, da möglichst kleine Kontaktwiderstände für eine hohe Transistorsteilheit und ein niedriges Rauschen entscheidend sind. Sehr gute Kontaktwiderstände konnten bei Raumtemperatur wie auch

bei kryogenen Temperaturen erreicht werden. Aufgrund der Kanaltiefe von ungefähr 40 nm musste ein tiefes Dotierungsprofil gewährleistet werden.

Im Hinblick auf die Verwendung der HEMTs in kryogenisch-gekühlten Verstärkern wurden verschiedene vertikale Schichtstrukturen untersucht. Dabei konzentrierte man sich auf die Schichtstrukturen, welche einen vergleichsmässig hohen Indiumgehalt im Kanal besitzen. Dank des höheren Anteils an Indium konnte die Elektronenmobilität und die Elektronengeschwindigkeit erhöht werden. Diese Transporteigenschaften des Bauteils verbessern sich bei kryogenen Temperaturen erheblich, da der Einfluss der Phononenstreuung verschwindend klein wird. Die Untersuchung und Charakterisierung der Transistoren mit den verschiedenen vertikalen Schichtstrukturen wurde bei Raumtemperatur und bei kryogenen Temperaturen durchgeführt. Dank der hervorragenden Materialeigenschaft der verspannten Struktur konnte der HEMT in Bezug auf Rauschen, Verstärkung und DC-Verbrauch im Vergleich zur gitterangepassten Struktur verbessert werden.

Ein arbeitspunktabhängiges Kleinsignalmodell wurde im Hinblick auf den Entwurf der rauscharmen Verstärker entwickelt. Eine sehr gute Übereinstimmung der simulierten und der gemessenen S-Parameter wurde bei Raumtemperatur und bei kryogenen Temperaturen erzielt. Dies zeigt, dass die extrinsischen und intrinsischen Elemente des Kleinsignalmodells sehr genau ermittelt werden konnten. Neben dem Arbeitspunkt kann in diesem Modell die Anzahl der Gatefinger und die Gatebreite frei gewählt werden. Die Skalierbarkeit des Modells wurde für mehrere Transistorgrößen und in einem weiten Betriebsbereich validiert.

Die untersuchten HEMT Strukturen bildeten die Grundlage für die Entwicklung von rauscharmen Verstärkern in einem Frequenzbereich von 4 bis 49 GHz. Die entwickelten Verstärker im C/X-, K- und Q-Band zeigten im kryogenen Betrieb sehr gute Resultate. Diese Ergebnisse bestätigen auch die Eignung unserer 0.2 μm InP HEMT Technologie für diese Anwendung. Die Überlegenheit der HEMT Struktur mit verspanntem gegenüber der mit gitterangepasstem Kanal konnte mit dem Entwurf und der Herstellung eines K-Band Verstärkers demonstriert werden. Dazu wurde dieser auf beiden Materialsystemen hergestellt. Höhere Verstärkung und geringeres Rauschen konnte für den Verstärker mit dem verspannten Kanal gemessen werden.